

Einfluss der Makrorauigkeit eines geschlängelten Blockwurfes auf den Sedimenttransport und Kolkerscheinungen in Flusskurven

Philippe Chèvre, Anton Schleiss

Kurzfassung

Neuzeitliche flussbauliche Massnahmen sollten nicht nur die Hochwassersicherheit gewährleisten, sondern auch die ökologische Funktionsfähigkeit des Gewässers verbessern. Dazu gehören auch möglichst naturnah gestaltete Ufer wie geschwungene raue Blockwürfe mit Buchten. Mit systematischen Modellversuchen wurde der Einfluss von geschlängelten Blockwürfen mit variablen Böschungsneigungen auf Erosion und Geschiebetransport in Flusskurven untersucht. Dabei konnten wertvolle Erkenntnisse zum Strömungs- und Erosionsverhalten solcher naturnaher Uferschutzmassnahmen gesammelt werden. Neben einer erhöhten Strömungsvielfalt führt ein geschwungener Blockwurf auch zu einer abwechslungsreicheren Sohlenmorphologie und somit zu verbesserten Lebensbedingungen für die aquatischen Lebewesen. Die Resultate der systematischen Modellversuche erlauben, praktische Hinweise und Empfehlungen für die Gestaltung von geschlängelten Blockwürfen mit variablen Böschungsneigungen zu geben.

Résumé: Influence de la macro-rugosité d'un enrochement ondulé sur le charriage et l'érosion en courbe

L'aménagement des cours d'eau a longtemps été considéré d'un point de vue fonctionnel exclusivement, en regard de la protection contre les crues. Les mesures d'aménagement se doivent aujourd'hui d'intégrer également les aspects environnementaux, sociétaux et économiques. Dans ce contexte, des essais sur modèle physique ont été réalisés pour déterminer l'influence géométrique d'un enrochement dans un écoulement en courbe. Deux géométries ont été testées, la première avec un talus à pente régulière comme situation de référence, la seconde avec un talus ondulé, dans l'optique d'améliorer les conditions hydromorphologiques du cours d'eau. Les paramètres étudiés sont le débit d'écoulement, le charriage des sédiments, l'érosion du lit et la stabilité de l'enrochement. A part d'une grande diversité de l'écoulement, l'enrochement ondulé produit également une morphologie du lit très varié ce qui améliore les biotopes pour la vie aquatique. Sur la base des résultats expérimentaux et des observations de comportement de l'écoulement, des conclusions et recommandations sont faites dans la perspective d'une application pratique du nouveau type de géométrie de rive.

Abstract: Influence of the macro-roughness of a bank protection by riprap on bed load transport and local scouring in river bends

Fluvial hydraulic engineering was considered for a long time from a functional point of view exclusively, with regard to flood protection. Hydraulic-engineering measures must also integrate the environmental, social and economic aspects today. In this context, experiments on a physical model were carried out to determine the geometrical influence of a riprap in a curved flow. Two geometries were tested, the first with a bank with regular slope as reference situation, the second with an undulated bank, in optics to improve the hydro-morphological conditions of the river. The studied parameters are the flow discharge, the transport of the sediments, the scouring of the bed and the stability of the riprap. On the basis of experimental results and observations of the flow behavior, conclusions and recommendations are given in view of practical application of the new type of bank geometry by riprap.

1. Einleitung

An vertikalen Ufermauern befestigte Makrorauigkeiten (vertikale Rippen) können die Kolke an der Aussenseite von Flusskurven erheblich vermindern (Hersberger und Schleiss, 2004). Diese aufschlussreichen Ergebnisse können auch auf naturnah gestaltete Ufer wie geschlängelte raue Blockwürfe mit Buchten angewandt werden. Geschlängelte Blockwürfe erhöhen die Strömungsvielfalt und bewirken zudem eine abwechslungsreiche Sohlenmorphologie mit lokalen Kolken und Kiesablagerungen, was gegenüber einem konventionellen Blockwurf auch einen erheblichen ökologischen Gewinn bedeutet (Schleiss, 2000). Im Rahmen einer Abschlussarbeit des Nachdiplomstudiums in hydraulischen Anlagen wurde der Einfluss von solchen naturnah gestalteten Blockwürfen auf die lokale Erosion in Kurven sowie den Geschiebetrieb mittels systematischer Modellversuche aufgezeigt (Chèvre, 2004). Insbesondere wurde den folgenden konkreten Fragestellungen nachgegangen:

- Wie beeinflusst eine naturnah gestaltete Uferschutzmassnahme (geschlängelter Blockwurf mit variablen Böschungsneigungen) den Geschiebetransport in einem Fluss?
- Wie verändert sich der Kurvenkolk am Fusse von solchen Massnahmen durch deren naturnahe Gestaltung?
- Wie sind die lokalen Strömungsverhältnisse charakterisiert (Rückströmungen als Fischrefugien)?
- Wie müssen die Massnahmen gestaltet werden, um den grössten ökologischen und flussbaulichen Gewinn zu erhalten?

Der vorliegende Artikel fasst die wesentlichen Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammen und gibt Empfehlungen für die Wasserbaupraxis.

2. Anordnung und Umfang der hydraulischen Modellversuche

Die systematischen Versuche wurden im 1 m breiten und 90° gekrümmten LCH-Kurvenkanal durchgeführt (Hersberger und Schleiss, 2004). Vorerst wurden zwei verschiedene

Geometrien von Blockwürfen an der Aussen-
seite der Kurve untersucht (Bild 1):

- 1) Konventioneller Blockwurf mit konstanter
Neigung von $1/m = 2/3$
- 2) Geschlängelter Blockwurf mit variabler
Neigung zwischen $1/m = 1/2$ (Ausbuch-
tungen) und $4/5$ (Buchten) (Bild 2)

Anschliessend wurde noch eine ver-
besserte Geometrie eines geschlängelten
Blockwurfes untersucht, mit dem Ziel, die
Stabilität der am stärksten belasteten Zonen
zu verbessern und die lokalen Kolke zu redu-
zieren (siehe Abschnitt 7). Drei verschiedene
Abflussmengen wurden untersucht: 70 l/s,
85 l/s und 100 l/s. Folgende Parameter wur-
den während der Versuche konstant gehal-
ten:

- Kurvenradius von 6 m (Achse)
- Sohlenlängsgefälle, $J = 0,5\%$
- Sohlenkornverteilung, $d_m = 4,6$ mm, $d_{30} = 3,3$ mm, $d_{50} = 3,8$ mm, $d_{90} = 7,2$ mm (ent-
spricht in etwa der normierten Verteilung
eines Kies führenden Gebirgsflusses in
Natur)
- Durchmesser der Blöcke des Blockwurfes,
 $d_B = 32\text{--}64$ mm

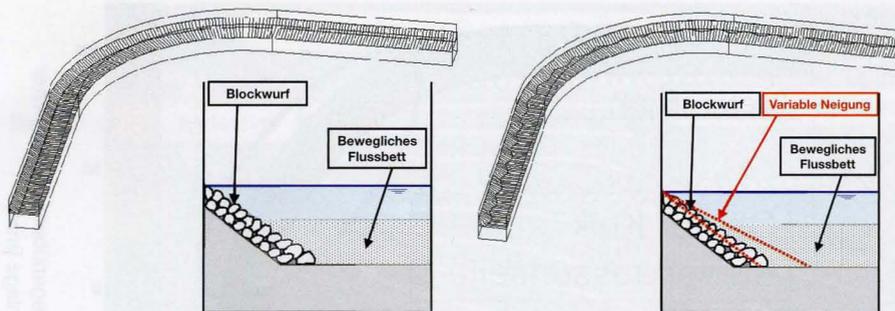
Für randvollen Abfluss ergab sich mit
diesen Parametern in der Versuchsinstalla-
tion für den Blockwurf mit konstanter Nei-
gung ein globaler Rauigkeitsbeiwert nach
Strickler von rund $k_{St} = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Mit diesem
wurden die Abflusstiefen rechnerisch er-
mittelt (Tabelle 1).

Die Versuche wurden unter dynami-
schem Gleichgewicht bezüglich Geschie-
betransport durchgeführt, das heisst, am Ka-
nalanfang mit Normalabflussbedingungen
wurde so viel Geschiebe dem Abfluss zuge-
fügt, dass sich der Wasserspiegel resp. die
Sohlenlage während des Versuchs nicht än-
derte. Nach 3 bis 4 Stunden wurde eine statio-
näre Sohlenmorphologie in der Kurve erreicht,
und die Kolkiefen änderten sich nicht mehr.

Die hydraulischen Kennwerte der ver-
schiedenen Versuche sind in Tabelle 1 zu-
sammengefasst.

3. Erosions- und Ablagerungszonen

Für den Blockwurf mit konstanter Nei-
gung entstanden immer zwei ausgeprägte Kolke,
nämlich an der Kurvenaussenseite sowie un-
mittelbar flussabwärts (Bild 3). Der erste Kolk
in der Kurve beginnt etwa bei 30° in der Ver-
längerung der Kurveninnenseite am Fusse
des Blockwurfes. Der zweite Kolk bildet sich
am Kurvenausgang, wo die Strömung sich
wieder beschleunigt, und erstreckt sich von
der Gerinnemitte gegen die Innenseite (Bild
3). Infolge der Sekundärströmung wurde das
feinere Geschiebe an die Kurveninnenseite
transportiert, und es entstand dort die typi-



Konstante Böschungsneigung (2:3)

Variable Böschungsneigung (1:2 bis 4:5)

Bild 1. Untersucher Blockwurf an der Kurvenaussenseite mit konstanter (links) und variabler Neigung mit geschlängelter Fusslinie (rechts).

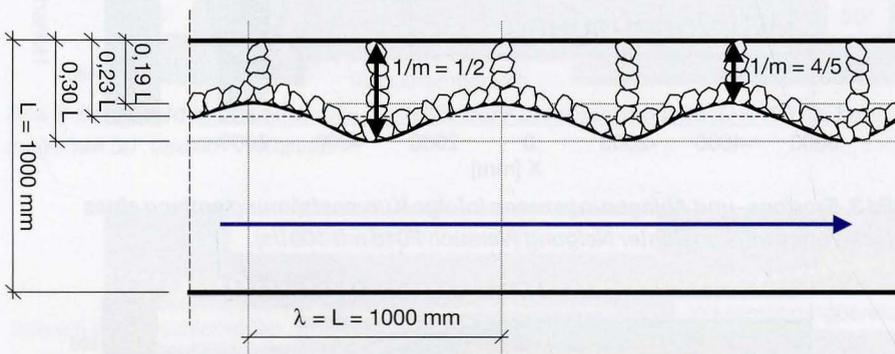


Bild 2. Geometrische Definition des im Versuchskanal untersuchten Blockwurfes mit geschlängelter Fusslinie.

Geometrie des Blockwurfes (Versuchsname)	Q Abfluss [l/s]	J Gefälle [-]	h_m Abflusstiefe gemessen [m]	h_m Abflusstiefe berechnet [m]	A Abfluss- fläche [m ²]	U Benetzter Umfang [m]	R_h Hydr. Radius [m]	V_m Mittl. Geschw. [m/s]	Fr Froude- zahl [-]
Konstante Neigung (F01b)	70	0,005	0,118	0,113	0,097	1,092	0,089	0,72	0,68
Konstante Neigung (F01c)	85	0,005	0,129	0,128	0,112	1,134	0,098	0,76	0,68
Konstante Neigung (F01d)	100	0,005	0,143	0,142	0,125	1,173	0,107	0,80	0,68
Variable Neigung (F06b)	70	0,005	0,118	0,121	0,100	1,093	0,091	0,70	0,64
Variable Neigung (F06c)	85	0,005	0,135	0,137	0,115	1,143	0,100	0,74	0,64
Variable Neigung (F06d)	100	0,005	0,151	0,152	0,129	1,191	0,109	0,77	0,63

Tabelle 1. Hydraulische Kennwerte der Modellversuche im LCH-Kurvenkanal in der Zulaufstrecke mit Normalabfluss.

sche Ablagerungszone. Der lang gezogene
Kolk an der Kurvenaussenseite pflästerte
sich mit der Zeit mit grobem Geschiebe ab.

Für einen Blockwurf mit variabler Nei-
gung, das heisst mit einer geschlängelten
Fusslinie, entstand nicht ein einziger ausge-
prägter Kolk an der Kurvenaussenseite, son-
dern mehrere lokale Kolke in jeder Bucht (Bild
4). Diese sind das Resultat einer Beschleuni-
gung des Abflusses, welcher die Ausbuch-
tungen des Blockwurfes überströmt. Da-
durch bildet sich ein Wassersprung mit einem
Tauchstrahl zwischen den Buchten. Das erste
lokale Kolkloch entsteht etwa bei 25° in Ver-

längerung der Kurveninnenseite (Bild 4). Ab
 $2/3$ der Kurve vermindern sich die Tiefen der
lokalen Kolklöcher flussabwärts kontinuierlich.
Die Ablagerungen an der Kurveninnenseite
sind etwas grösser als im Falle des Blockwurfes
mit konstanter Neigung. Größeres Geschiebe
konnte wiederum in den Kolken an der Kurvenaussenseite,
feineres an der Kurveninnenseite beobachtet wer-
den. Unterwasserseitig der Ausbuchtungen
wurde der geschlängelte Blockwurf infolge
der Strömungsbeschleunigung stärker be-
anspruchung als ein Blockwurf mit konstanter
Neigung.

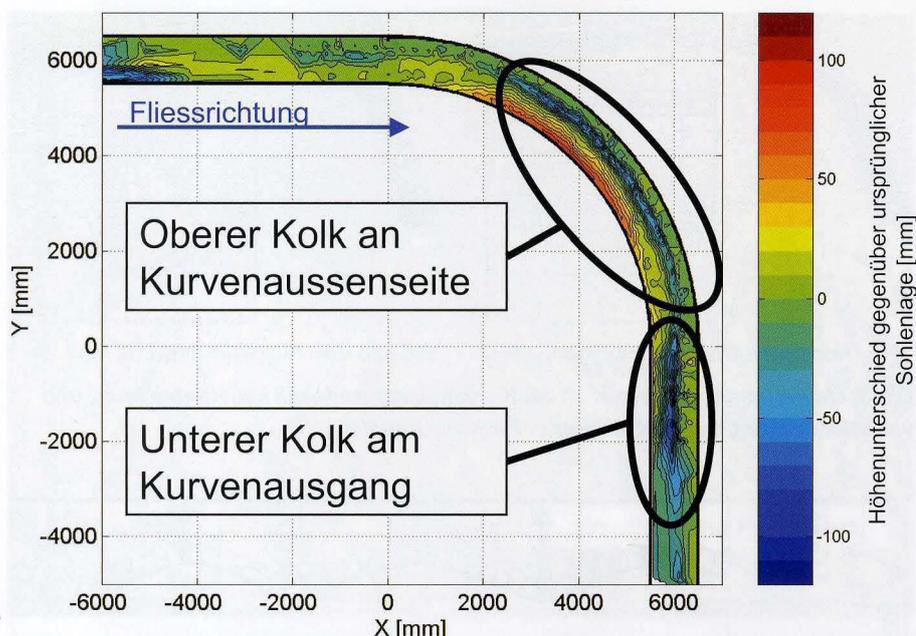


Bild 3. Erosions- und Ablagerungszonen infolge Kurvenströmung entlang eines Blockwurfes mit konstanter Neigung (Versuch F01d mit 100 l/s).

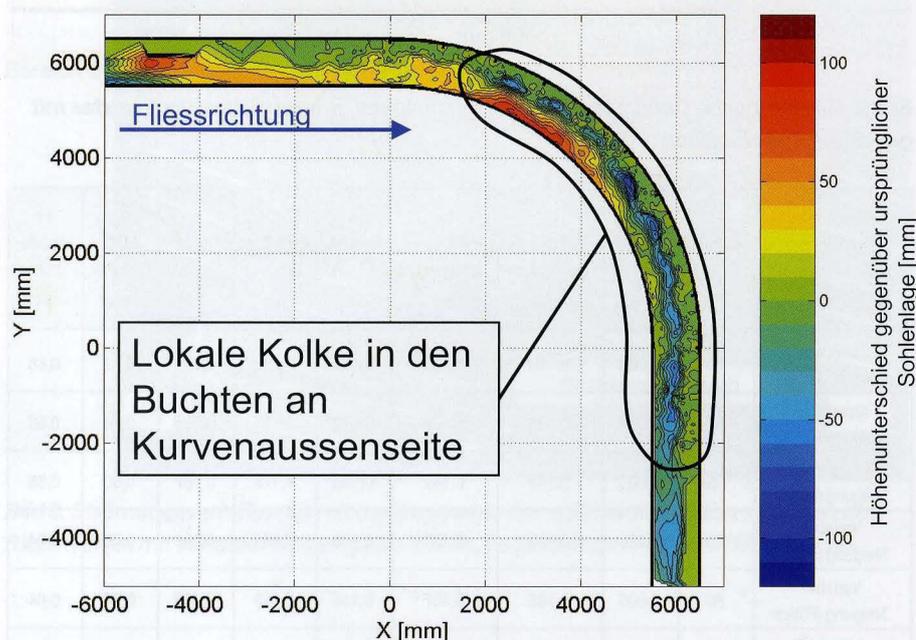


Bild 4. Erosions- und Ablagerungszonen infolge Kurvenströmung entlang eines Blockwurfes mit variabler Neigung und geschlängelter Fusslinie (Versuch F06d mit 100 l/s).

4. Strömungsverhältnisse

Entlang dem Blockwurf mit variabler Neigung können wesentlich vielfältigere Strömungsverhältnisse beobachtet werden als bei einem Blockwurf mit konstanter Neigung. Folgende Zonen können unterschieden werden (Bilder 5 und 6):

- Relativ kleine Strömungsgeschwindigkeiten an der Kurveninnenseite wie beim Blockwurf mit konstanter Neigung mit Transport von feinerem Geschiebe
- Eine enge Zone vor dem Blockwurf mit hohen Fließgeschwindigkeiten und Transport von grobem Geschiebe
- Starke Turbulenzen am Fusse der Ausbuchtungen, welche das Resultat einer be-

schleunigenden Überfallströmung mit anschließendem ertränktem Wassersprung sind. Der Tauchstrahl vor dem Wassersprung verursacht einen lokalen Kolk in der Ausbuchtung.

- Eine ruhige Rückströmung in den Buchten, welche in Ufernähe feinere Sedimente abgelagert.

Die gemessenen und berechneten Wasserspiegel in der Normalabflussstrecke am Kanalbeginn stimmen gut überein (Tabelle 1). Dabei wurde für den zusammengesetzten Querschnitt eine Rauigkeit nach Strickler von rund $k_{St} = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erhalten. Der Einfluss des geschlängelten Blockwurfes wurde durch eine um die Tiefe der Ausbuchtungen redu-

zierte Kanalbreite berücksichtigt, was wie erwähnt zu einer ausreichend genauen Schätzung der Abflusstiefe führt.

5. Geschiebetransport

Der gemessene Geschiebetransport durch die Kurve wurde für die beiden untersuchten Blockwurfgeometrien miteinander verglichen. Dabei zeigte sich, dass im Falle des Blockwurfes mit variabler Neigung, also mit geschlängelter Fusslinie, die Geschiebetransportkapazität für den Abfluss von 100 l/s um 25% erhöht wurde. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die effektive Kanalbreite durch die Ausbuchtungen reduziert wird (um 10%) und somit die mittleren Abflusstiefen erhöht werden (um 7%). Dadurch ergeben sich höhere Sohlenschubspannungen und somit ein erhöhter Geschiebetransport.

6. Vergleich der Kurvenkolkmorphologie

Bei einem Blockwurf mit variabler Neigung entsteht, wie bereits erwähnt, nicht ein lang gezogenes Kolkloch an der Kurvenaussenseite, sondern in jeder Bucht ein relativ tiefer, lokaler Kolk (Bild 7). Dieser ist das Resultat des Überfallstrahles, welcher auf der Ausbuchtung entsteht. Dem überlagert dürfte der normale, aber im Vergleich zum glatten Blockwurf reduzierte Kurvenkolk sein.

Werden die Längensprofile der Sohlenlage für die beiden Blockwurfgeometrien miteinander verglichen, so kann nicht eindeutig gesagt werden, welche Konfiguration die grössere mittlere Sohlenerosion verursacht (Bild 7). Immerhin kann davon ausgegangen werden, dass ein lang gezogenes Kolkloch bezüglich der Gesamtstabilität des Blockwurfes eher ungünstiger ist. Die Kolke in den Buchten beim geschlängelten Blockwurf sind wohl tiefer, aber für dessen Stabilität weniger gefährlich, da auf einen räumlichen Effekt gezählt werden kann.

7. Optimierte Geometrie des Blockwurfes mit variabler Neigung

Beim Überströmen der Ausbuchtungen des Blockwurfes mit anschließendem Wassersprung wird der Blockwurf stark beansprucht, was lokal wesentlich grössere Blockdurchmesser erfordern würde. Zudem entsteht der erwähnte Tauchstrahl mit anschließendem ertränktem Wassersprung.

Um diese Phänomene zu verringern, wurde nach einer verbesserten Geometrie der Ausbuchtungen gesucht. Diese wurde dadurch gefunden, dass die Neigung der Ausbuchtung stromabwärts reduziert wurde (Bild 8). Um die Buchten in ihrem Ausmass nicht zu reduzieren, wurde die Wellenlänge

des geschlängelten Blockwurfusses auf $\lambda = 1,2 L$ erhöht, wobei L der Gerinnebreite entspricht (vgl. Bild 2). Durch diese Optimierung konnte der Wassersprung unterhalb der Ausbuchtung unterdrückt und so die Beanspruchung des Blockwurfes erheblich reduziert werden (Bild 9). Die lokalen Kolk-tiefen in den Buchten wurden dadurch teilweise vermindert, wenn auch nur geringfügig (Bild 10).

8. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mit systematischen Modellversuchen wurden die Strömungsverhältnisse und das Erosionsverhalten entlang eines geschlängelten Blockwurfes mit variabler Böschungsneigung an der Kurvenaußenseite eines Gewässers untersucht. Dabei können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Strömungsvielfalt gegenüber einem Blockwurf mit konstanter Neigung wird deutlich erhöht mit turbulenten Zonen in der Nähe der Ausbuchtungen und ruhigen Rückströmungen in den Buchten, welche als Fischrefugien dienen können.
- Es entsteht ebenfalls eine stark variable Sohlenmorphologie mit lokalen, tiefen Kolken in den Buchten sowie Ablagerungen von feinerem Kies stromabwärts in Ufernähe, sodass sowohl verbesserte Voraussetzungen für Jagd- wie auch Laichgründe der Fische geschaffen werden dürften.
- Die Ausbuchtungen des Blockwurfes verringern etwas die Abflusskapazität und erhöhen somit die Wasserspiegel (Größenordnung 10% für die untersuchte Blockwurfgeometrie). Demgegenüber wird die Geschiebetransportkapazität erheblich erhöht (25% bei randvollem Abfluss der untersuchten Konfiguration).
- Obwohl im Vorfeld der Buchten relativ tiefe lokale Kolke entstehen, ist der geschlängelte Blockwurf wegen des räumlichen Trageffekts weniger durch Unterkolkung gefährdet als ein Blockwurf mit konstanter Neigung, an dessen Fuss ein lang gezogenes Kolkloch entsteht.
- Die Blöcke auf der Unterwasserseite der Ausbuchtungen sind stärker belastet als im Falle eines Blockwurfes mit konstanter Neigung. Die Durchmesser der Blöcke müssen an dieser Stelle etwa um 10% bis 30% erhöht werden. Andererseits sind die Ufer in der unteren Hälfte der Buchten kaum belastet, sodass dort die Blockgrößen reduziert beziehungsweise gänzlich auf den Blockwurf verzichtet werden kann.

Bezüglich konstruktiver Gestaltung und Dimensionierung können für Anwendungen in Voralpen- und Gebirgsflüssen folgende Empfehlungen gegeben werden:

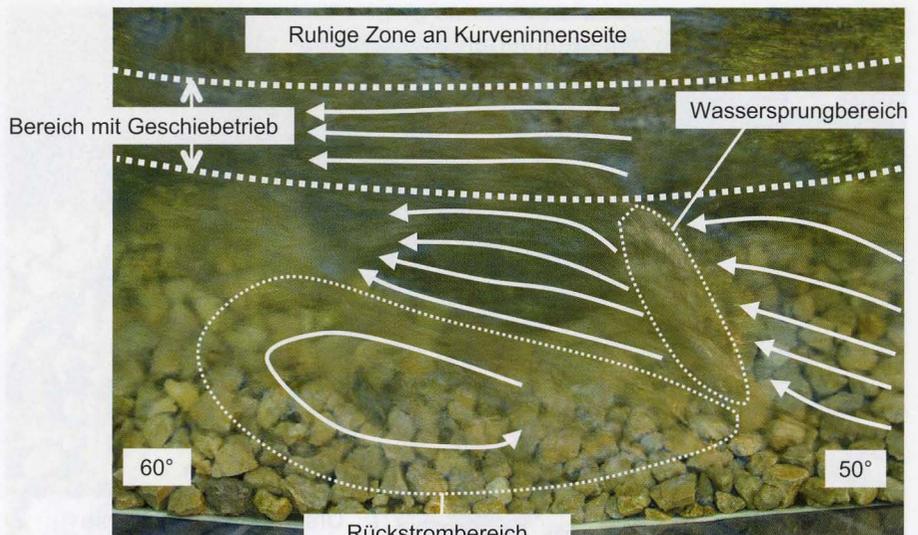


Bild 5. Draufsicht auf Strömung in der Nähe der Kurvenaußenseite ($Q = 100 \text{ l/s}$, Lage zwischen 50° und 60° in Kurve).

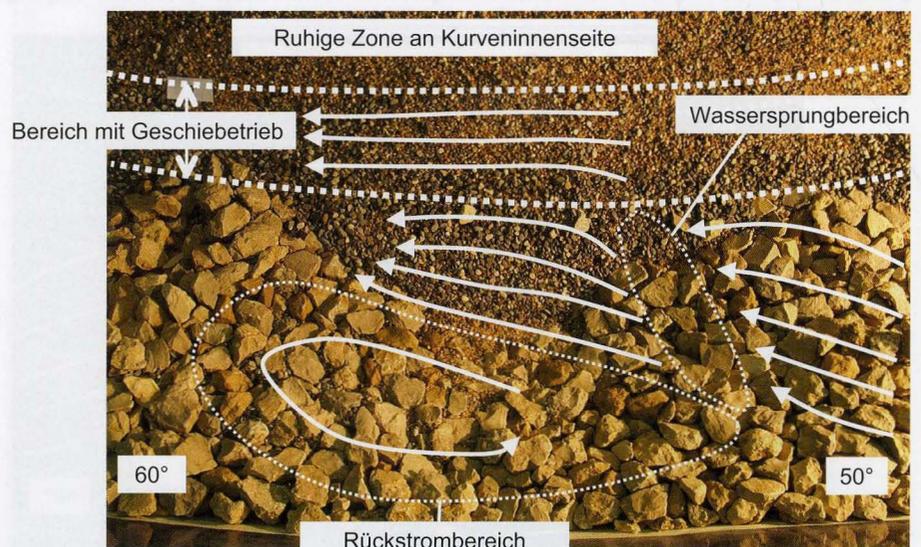


Bild 6. Draufsicht auf Sohlenmorphologie in der Nähe der Kurvenaußenseite (stationärer Zustand nach $Q = 100 \text{ l/s}$, Lage zwischen 50° und 60° in Kurve).

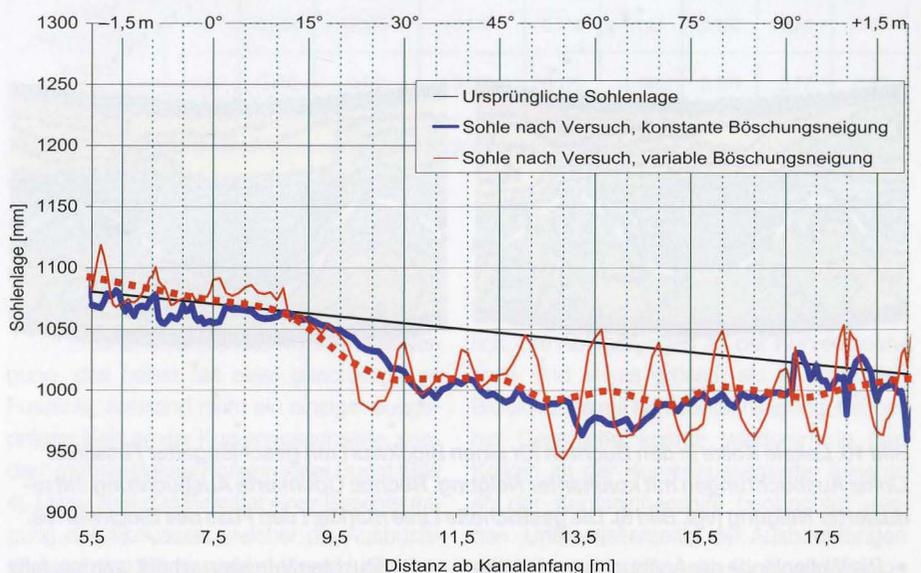


Bild 7. Vergleich der Längsenprofile der Sohlenlage für die beiden Blockwurfgeometrien ($R = 6100 \text{ mm}$, $Q = 100 \text{ l/s}$). Die rot gestrichelte Linie entspricht der mittleren Sohlenlage für den Blockwurf mit variabler Neigung.

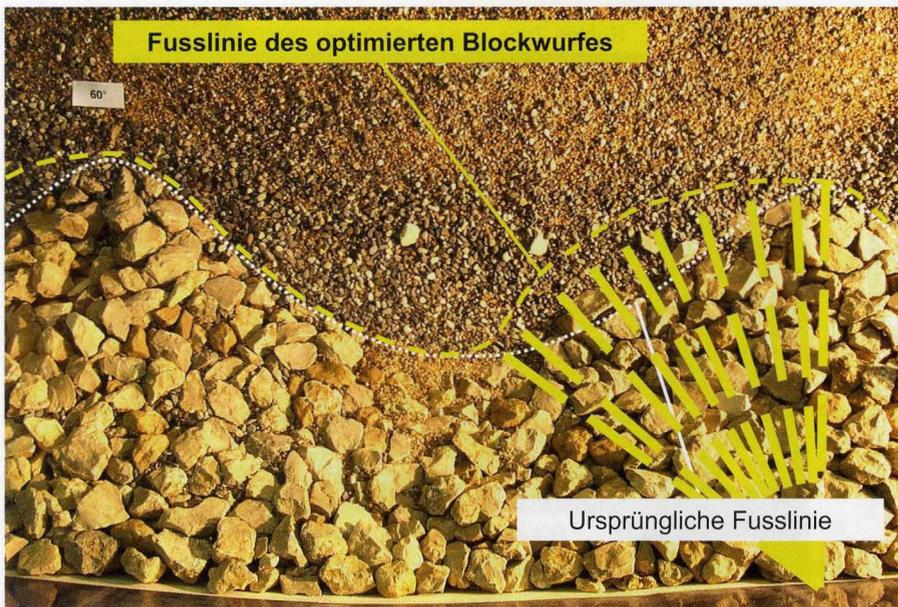


Bild 8. Geometrie der optimierten Ausbuchtungen des Blockwurfes mit variabler Neigung.

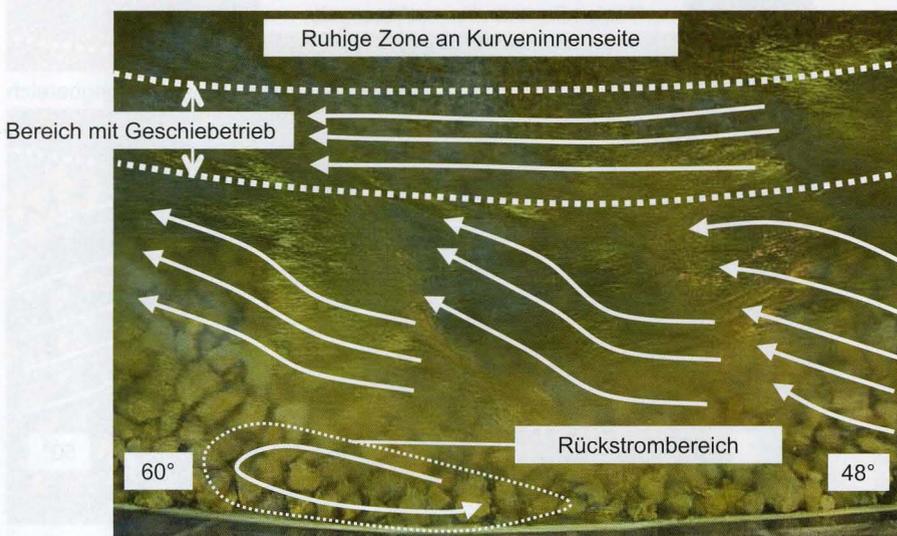


Bild 9. Strömungsverhältnisse mit der Geometrie der optimierten Ausbuchtungen des Blockwurfes mit variabler Neigung ($Q = 100 \text{ l/s}$, Lage zwischen 48° und 60° in Kurve).

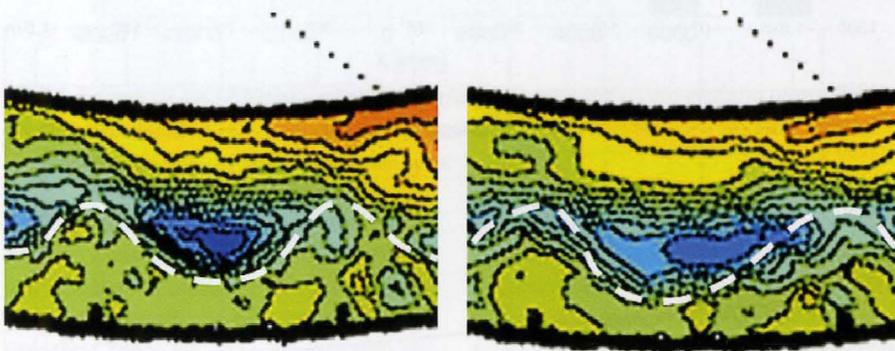


Bild 10. Lokale Kolke in den Buchten für einen Blockwurf mit geschwängelter Fusslinie. Links: Ausbuchtungen mit konstanter Neigung. Rechts: Optimierte Ausbuchtung mit reduzierter Neigung (vgl. Bild 8). Die gestrichelte Linie markiert den Fuss des Blockwurfes.

Die Wellenlänge der Ausbuchtungen sollte etwa der 1,2fachen Gerinnebreite und die Tiefe der Buchten 10% der Gerinnebreite entsprechen.

Die Buchtentiefe kann erhöht werden, falls die Gerinnebreite gegenüber dem Ufer mit konstanter Neigung vergrössert werden kann.

- Die Ausbuchtungen sollten asymmetrisch, das heisst mit reduzierter Böschungsneigung unterwasserseitig ausgeführt werden (1:2 bis max. 2:3).
- Die Abflussberechnung für das Gerinne mit einem geschwängelten Blockwurf kann in guter Näherung mit einer effektiven Breite durchgeführt werden, welche ab den Ausbuchtungsköpfen gemessen wird.
- Die Kolkentiefe entlang dem Blockwurf kann mit der Formel von Kikkawa et al. (1976) abgeschätzt werden, wobei die Referenzachse für die Sohlenquerneigung in der Sohlenmitte angenommen wird (Sohlbreite ab Ausbuchtungsköpfen gemessen). In der oberwasserseitigen Hälfte der Buchten sollten jedoch zusätzliche grössere Einzelblöcke in Ufernähe gesetzt werden, welche die lokalen Kolke unterhalb der Ausbuchtungen hemmen.

Verdankung

Die Studie wurde als Abschlussarbeit des Nachdiplomstudiums in hydraulischen Anlagen am LCH-EPFL im Rahmen des Forschungsprojektes «Rhone-Thur» mit der finanziellen Unterstützung des Bundesamtes für Wasser und Geologie durchgeführt. Die Beratung bezüglich Messtechnik und Datenerfassung erfolgte durch Dr. Daniel Hersberger.

Literatur

- Chèvre Ph. (2004): Influence de la macro-rugosité d'un enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe. Communication n° 19 du Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 243 p.
- Hersberger D., Schleiss A. (2004): Einfluss von vertikalen Rauigkeitsrippen auf die Kolkgefahr entlang von gekrümmten Ufermauern. Wasser Energie Luft, 96. Jahrgang, Heft 9/10, pp. 227–233.
- Kikkawa H., Ikeda S., Kitagawa A. (1976): Flow and bed topography in curved open channels. Journ. of the Hydr. Div., Vol. 102, No. HY9, pp. 1327–1342.
- Schleiss A. (2000): Bemessung und Gestaltung von Blockwürfen in Gebirgsflüssen. Proceedings Internationales Symposium Interpraevent 2000, Villach, Vol. 2, pp. 351–360.

Anschrift der Verfasser

Philippe Chèvre, Dipl. Bauing. ETHL, SBB AG, I-NP-LR, Schanzenstrasse 5, CH-3000 Bern 65, E-Mail: philippe.chevre@sbb.ch

Anton Schleiss, Prof. Dr. Dipl. Bauing. ETHZ, Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL-ENAC-ICARE, GC A3 514 (Bât. GC), Station 18, CH-1015 Lausanne, E-Mail: anton.schleiss@epfl.ch